

## Le sujet

Fin octobre 2025 l'actualité rapporte un problème de descente, non demandé par le pilote, d'un **avion A320**. Le 'logiciel' d'un **calculateur d'ailerons** est en cause, et ce 'bug' serait dû au **rayonnement solaire** important du moment.



Voyons les paramètres en cause...

## Particules solaires et perturbations

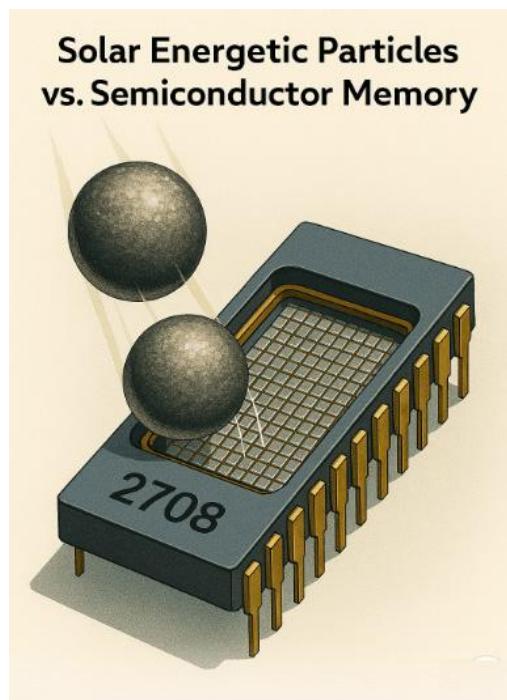
*Les particules solaires sont des électrons, protons et noyaux atomiques accélérés à haute énergie par l'activité du Soleil (éruptions solaires, éjections de masse coronale, vent solaire). Transportées dans l'espace interplanétaire, elles peuvent atteindre la Terre et interagir avec son champ magnétique et son atmosphère.*

Les 'perturbations' sont des « inversions de bit » sur une mémoire ( ROM ) ou ( RAM ) ou des registres de cpu, uC ou de leur environnement dynamique, provoquées par ces particules. ( SEU ) [\*1] . Dans tout environnement électronique, les perturbations peuvent aller du bug fugitif anodin à une action grave inattendue. Le logiciel ne fait plus ce qu'il est censé faire alors même qu'il n'en est pas la cause !

La **CEM** constitue un autre domaine, avec ses propres causes [\*2]



Intel  
**2708**  
Military grade  
-40 ..+85°C  
Musée D.L.



## Blindage

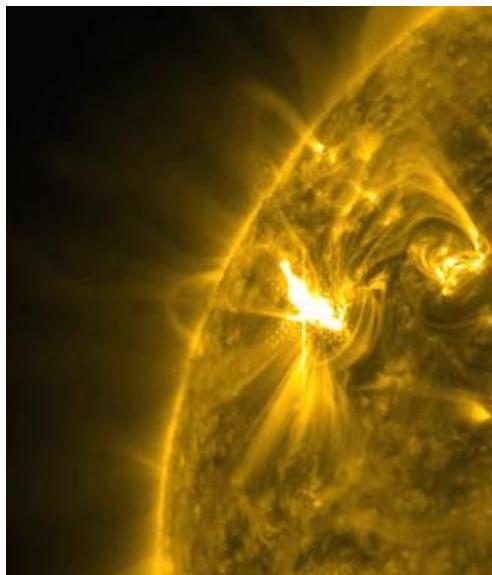
Ces calculateurs sont dans des caissons acier ou alu mais les particules ( protons solaires ) à haute énergie et même cosmiques ( ions lourds ) passent au travers sans problème... [\*3] et de même pour les humains.



## Altitude avions, satellites

Pourquoi évoque-t-on moins les appareils autour de nous, du Smartphone aux gros supercalculateurs en passant par nos voitures. En mode ‘ régulateur de vitesse ‘ vont-elles accélérer sans le demander ? Notre radio va-t-elle transmettre seule ? Les cas avec cette cause avérée sont très rares, plutôt cem ou fiabilité...

Le flux de ces particules est 50 à 100 fois moins élevé au sol, selon l'angle d'incidence, qu'en haute altitude, et 10.000 fois moins que dans l'espace, freinées ou absorbées par notre atmosphère, et... visibles comme aurores boréale [\*4] [\*11]

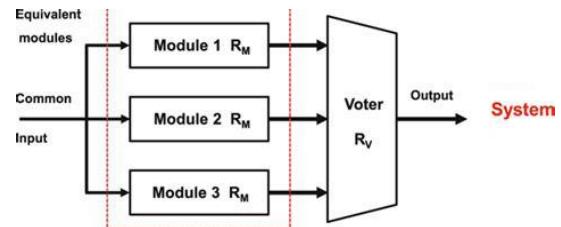


## Tolérances aux SEU

Puisqu'il n'est pas possible de se protéger des particules et de leurs effets, alors on recourt à des moyens de détection d'anomalies hard voire soft .

## Protections et contrôles

Les méthodes industrielles connues sont les 'chiens de garde' matériels ( watchdog ) [\*5], les tests cycliques de contrôle de l'intégrité d'une ROM ( checksum ) [\*6] , les mémoires avec correction ( ECC ) [\*7] et d'autres sur les tensions etc.

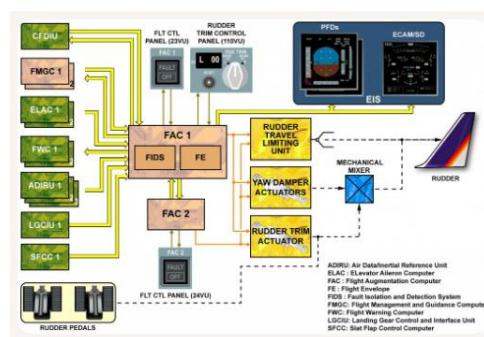


## Redondances

Pourquoi parle-t-on peu de plan B , de secours ...

**ELAC (Thales)** installés en double (ELAC 1 et ELAC 2) dans la baie avionique. Ils contrôlent directement les **gouvernes de profondeur et les ailerons**, avec une logique de redondance et de surveillance croisée.

La redondance en doublon existe, mais l'événement a révélé une **faiblesse dans la gestion des basculements**, c'est toute la complexité du problème ! ( cf liens )

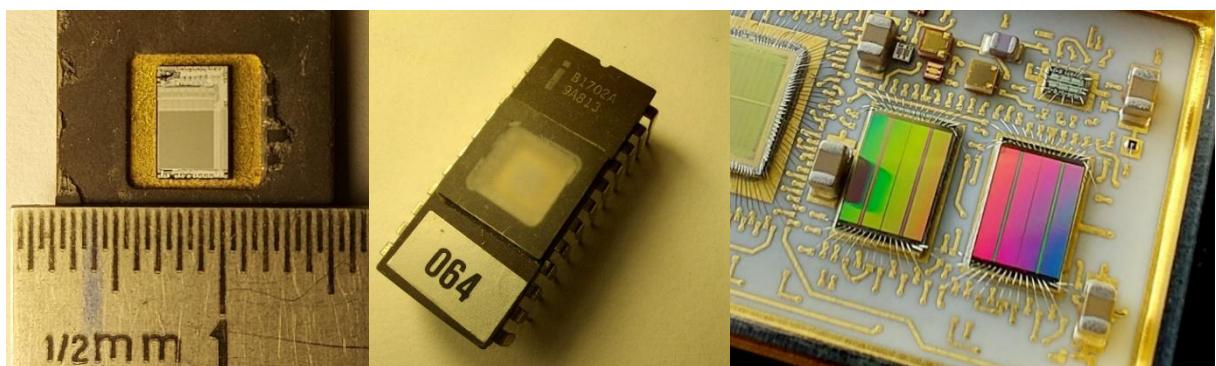


Une méthode haute 'déterministe' est la **redondance triple** (TMR) ( ou impaire ) , ici 2 calculateurs sur les 3 doivent être d'accord ensemble et le 'voter' pour valider une opération en sortie. Cela permet de contrer aussitôt une défaillance hard, mais pas forcément une anomalie soft ou fonctionnelle selon les effets attendus et selon les 'règles', les 'ordres' et les 'capteurs' communs ou pas ! Elle Implique plus de matériels, de poids, d'énergie et de coûts ! [\*8]

## En résumé

Dans les 70's, une particule solaire était comme une **poussière** tombant sur une **case d'échiquier**, sans perturber ce 'bit' mémoire. Aujourd'hui, la même poussière couvre beaucoup de cases entières, brouillant voire détruisant plusieurs mots mémoire.

La taille des cases mémoire s'est réduite de quelques micromètres ( **μm** ) à quelques dizaines de nanomètres ( **nm** ) soit un rapport 100 et en surface **10.000 !** Une **particule ionisante** dont la 'trace' dans le silicium fait typiquement **quelques micromètres** ( **μm** ) devient, en proportion, "énorme" par rapport à un 'bit' actuel.



Dans les 70's j'ai utilisé des eeprom 1702A ( les 1ères nmos 1971 ) 256 x 8 bits , 3 tensions 5v +12v -12v ! puis les 2708 et la suite... La dimension d'une cellule mémoire nmos (ou pmos) de l'époque est de 5 à **10 μm** ( 1/100 de mm ). [\*9] [\*10]

Dans une eeprom l'unité mémoire est une micro capa ' flottante' chargée à la programmation et 'déchargée' ( reset ) par exposition aux U.V. voire **particules...**

La ' trace ' d'une particule est de **quelques μm à quelques dizaines de μm**

Sa charge critique  $Q_c$  associée au seuil d'environ 1V en CMOS, définit l'énergie équivalente nécessaire. Lorsqu'une particule agit ainsi en **profondeur** dans le silicium, on parle de 'volume sensible', et c'est ce qui peut provoquer le basculement d'un SEU et des perturbations...

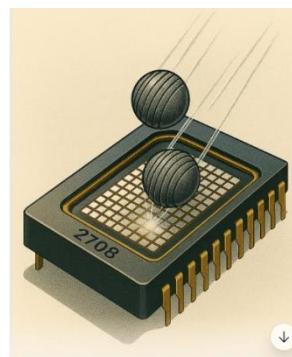
Article de vulgarisation pour l'ARA35 décembre 2025  
Contrôles des termes et des unités, dessin avec IA ,  
bases sources en liens, photos auteur et du web,  
Intel 2708,1702 musée auteur  
Le 1<sup>er</sup> R3 avait une ' 2708 ' pour l'histoire...

Dominique LEVEQUE F5BEZ



## Notes

\*1 Les particules solaires ou cosmiques peuvent provoquer des *Single Event Upsets (SEU)*, c'est-à-dire des inversions de bits dans les mémoires ou registres des microcontrôleurs.



\*2 Les perturbations ou dégâts liés aux phénomènes CEM, tels que les inductions électriques ou électromagnétiques extrêmes (foudre, impulsion électromagnétique nucléaire, etc.) relèvent d'un **autre domaine**. Les protections et les méthodes évoquées ici (blindage, redondance, correction d'erreurs) sont du même ordre.

\*3 blindages multicouches ( Z-grades ), ESA, CubeSats réduisent le risque. Le plomb trop lourd, arrête les rayons X et gamma, mais peut alors produire des rayonnements secondaires ( delta, neutrons ) néfastes...

\*4 Une aurore boréale est dû à l'ionisation et ' l'excitation ' des gaz atmosphériques par les particules solaires, suivies de l'émission de lumière lors de leur ' désexcitation ', vert surtout, rouge par l'oxygène d'altitude, bleu, violet par l'azote.

\*5 Un logiciel sécurisé, en plus de son traitement d'algorithmes, déclenche cycliquement une monostable hardware ( retriggerable ) laquelle, si elle n'est plus relancée ' tombe ' et déclenchera une action forte comme un reset.

\*6 De même une ROM est lue cycliquement et la somme modulo de ses mots est comparée à une valeur préétablie. S'il y a une différence on déclenchera une action forte comme un basculement de secours.

\*7 *ECC (Error-Correcting Code Memory) est une RAM dotée de circuits supplémentaires qui ajoutent des bits de contrôle à chaque mot mémoire. Ces bits permettent de vérifier l'intégrité des données lors de l'écriture et de la lecture.*  
*Correction en temps réel : si un bit est inversé ( ici à cause d'un SEU ), la mémoire corrige l'erreur.*

NB **ROM EEPROM** et **RAM** sont des noms **génériques** ici car sous-entend une grande variété de types. On reste dans les mêmes faiblesses face aux particules.

\*8 passé pro en informatique industrielle en imprimerie dont \*5 \*6

\*9 passé pro en électronique des semi-conducteurs à SGS ( ST )

\*10 Un micro-grain de sable de 10 à 20 µm entre les dents sera détecté !

\*11 voir liens articles sites activité solaire

## **Liens** ( à décembre. 25 )

[Airbus Orders Emergency A320 Recall After Solar Radiation Corrupts Flight-Control Data | Business - Times Now](https://www.timesnownews.com/business-economy/airbus-orders-emergency-a320-recall-after-solar-radiation-corrupts-flight-control-data-article-153220137)

<https://www.timesnownews.com/business-economy/airbus-orders-emergency-a320-recall-after-solar-radiation-corrupts-flight-control-data-article-153220137>

[Explainer: How Intense Solar Radiation Can Impact Modern Aircraft – Waatea News: Māori Radio Station](https://waateanews.com/2025/11/29/explainer-how-intense-solar-radiation-can-impact-modern-aircraft/)

<https://waateanews.com/2025/11/29/explainer-how-intense-solar-radiation-can-impact-modern-aircraft/>

[Un rare bug logiciel constraint Airbus à modifier 6 500 A320 en urgence - MacGeneration](https://www.macg.co/ailleurs/2025/11/un-rare-bug-logiciel-constraint-airbus-a-modifier-6-500-a320-en-urgence-305323)

<https://www.macg.co/ailleurs/2025/11/un-rare-bug-logiciel-constraint-airbus-a-modifier-6-500-a320-en-urgence-305323>

[Radiation Hardened \(Rad Hard\) Electronics](https://www.baesystems.com/en/product/radiation-hardened-electronics)

<https://www.baesystems.com/en/product/radiation-hardened-electronics>

[radiation-hardened electronics for space | Military Aerospace](https://www.militaryaerospace.com/computers/article/55041115/radiation-hardened-electronics-for-space)

<https://www.militaryaerospace.com/computers/article/55041115/radiation-hardened-electronics-for-space>

[SPACEMON: Space Environment Monitoring Workshop 2025 \(11-13 juin 2025\): Design and Testing of a Satellite Multilayer Radiation Shielding Experiment - Indico at ESA / ESTEC](https://indico.esa.int/event/555/contributions/10897/)

<https://indico.esa.int/event/555/contributions/10897/>

[F4FAP Presentation parametres-solaires.pdf](https://ara35.fr/wp-content/uploads/2025/10/F4FAP_Presentation_parametres-solaires.pdf) [SimplexSolaire1.pdf](https://ara35.fr/wp-content/uploads/2024/11/SimplexSolaire1.pdf)

[https://ara35.fr/wp-content/uploads/2025/10/F4FAP\\_Presentation\\_parametres-solaires.pdf](https://ara35.fr/wp-content/uploads/2025/10/F4FAP_Presentation_parametres-solaires.pdf)

<https://ara35.fr/wp-content/uploads/2024/11/SimplexSolaire1.pdf>

[AURORE POLAIRE : Spectres et mécanismes d'émissions - Encyclopédie Universalis](https://www.universalis.fr/encyclopedie/aurore-polaire/3-spectres-et-mecanismes-d-emissions/)

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/aurore-polaire/3-spectres-et-mecanismes-d-emissions/>

[Qu'est-ce que la mémoire ECC ? | CORSAIR](https://www.corsair.com/fr/fr/explorer/diy-builder/memory/what-is-ecc-memory/)

<https://www.corsair.com/fr/fr/explorer/diy-builder/memory/what-is-ecc-memory/>

[CPU DIE SHOTS](https://fr.pinterest.com/pin/pc--620089442440306647/)

photos de DIE ( puces de uP, ram... )

<https://fr.pinterest.com/pin/pc--620089442440306647/>